

# Variabilidad climática: desde los patrones globales a las escalas sinópticas

M.J. Casado Calle, T. Losada Doval, B. Rodríguez-Fonseca y E. Rodríguez Camino

## 1. Introducción

En su sentido más restrictivo se define el clima como las condiciones atmosféricas medias – el tiempo promedio- de un determinado lugar y época del año. Más rigurosamente se define como la descripción estadística en términos de la media y de las fluctuaciones de magnitudes relevantes sobre un periodo de tiempo que va desde los meses a los millones de años. El periodo estándar definido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) es de 30 años. En un sentido más general, la definición de clima se amplía a la descripción estadística en términos de la media y de las fluctuaciones de las variables que definen el comportamiento del sistema climático (IPCC, 2007). El sistema climático consta de cinco componentes principales (atmósfera, hidrosfera, criosfera, superficie terrestre y biosfera) y de las complejas relaciones entre ellos. Las fluctuaciones respecto a este estado medio (también llamadas anomalías) pueden aparecer en distintas escalas espaciales y temporales, hablándose de fluctuaciones diarias, estacionales, interanuales, decadales, etc; según que el comportamiento anómalo se analice respecto a las medias diarias, estacionales, anuales, etc. Se suele definir la variabilidad climática de baja frecuencia, como las variaciones en los estados medios y otros índices estadísticos (por ejemplo, extremos) en escalas temporales (desde varias semanas a varios años) y espaciales mayores que los eventos sinópticos individuales que caracterizan el tiempo (IPCC, 2007). Estas fluctuaciones o anomalías del clima se pueden referir a periodos que van desde el mes, la estación, el año, el decenio, el siglo o superiores.

Las fluctuaciones asociadas a la variabilidad climática a menudo pueden describirse y cuantificarse mediante un número restringido de modos o patrones de variabilidad que representan circulaciones atmosféricas y/o oceánicas típicas (Cassou y Guilyardi, 2007). Estos modos se caracterizan por presentar una estructura espacial cuasi-fija de gran escala y una serie temporal asociada que caracteriza la evolución de esta estructura, su amplitud y su fase (Wallace y Gutzler, 1981; Barnston y Livezey, 1987; Bell y Halpert, 1995; Stoner et al., 2009). Es mediante los modos de variabilidad como aparece el término de teleconexión climática. Las teleconexiones se refieren a la anomalías del sistema climático que indican fluctuaciones recurrentes de la circulación (atmosférica u oceánica) en zonas distantes, típicamente a miles de kilómetros, correlacionadas entre sí (Rodríguez-Fonseca et al., 2010). Por tanto, las teleconexiones contribuyen a la variabilidad climática de la precipitación, la temperatura y otras variables relevantes que

describen el sistema climático. Las teleconexiones reflejan aspectos importantes de la variabilidad interna del sistema climático y también de la interacción entre sus componentes, singularmente entre la atmósfera y otros componentes de mayor inercia como los océanos.

La ocurrencia de los modos de variabilidad no es uniforme durante el año. Las estructuras espaciales de los modos, la intensidad de sus centros de acción y su comportamiento en el tiempo varían en función de la estación astronómica considerada, siendo el propio ciclo estacional un agente modulador de dichas estructuras. El origen de los modos que caracterizan la variabilidad del clima es muy diverso, hablándose de variabilidad interna cuando la causalidad se establece dentro de la propia componente del sistema climático considerado y de variabilidad externa cuando el origen de la variabilidad es ajeno a la componente del sistema a analizar. Así se habla de que la Oscilación del Atlántico Norte es producto de la variabilidad interna del sistema en el que las propias borrascas alimentan la posición de la corriente en chorro y viceversa, dando origen, de este modo a este patrón de variabilidad (Rivière y Orlanski, 2007). Sin embargo, otros fenómenos como la Oscilación del Sur son forzados externamente por el océano.

El cambio climático se refiere a cualquier cambio en el clima a lo largo del tiempo y se relaciona con los cambios persistentes (típicamente de escalas seculares o mayores) en el estado medio o en la variabilidad del sistema climático (IPCC, 2007). El cambio climático puede ser debido a causas internas relacionadas con la dinámica del sistema climático o a forzamientos externos, incluidos la acción humana alterando la concentración de gases de efecto invernadero y los usos del suelo, como es el caso del actual cambio climático en el que estamos inmersos. La diferencia esencial entre variabilidad climática y cambio climático reside en la persistencia de estos cambios.

En este trabajo se pretende presentar y resumir de una forma unificada el tratamiento de las distintas fluctuaciones atmosféricas y oceánicas que permiten describir el clima, centrándonos en el Hemisferio Norte. El estudio de los modos de variabilidad, tanto atmosféricos como oceánicos, en diferentes escalas temporales y espaciales permite una aproximación sistemática al estudio de la dinámica, tanto interna como forzada externamente, del sistema climático. Existen fuertes interacciones entre las fluctuaciones en las diferentes escalas de tiempo, por ejemplo, las fluctuaciones diarias o sinópticas son afectadas por los distintos modos de variabilidad y a su vez afectan a los mismos. De hecho,

ha habido intentos de buscar relaciones entre los patrones persistentes y recurrentes con la dinámica atmosférica y la escala sinóptica (Rheinhold y Pierrehumbert, 1982).

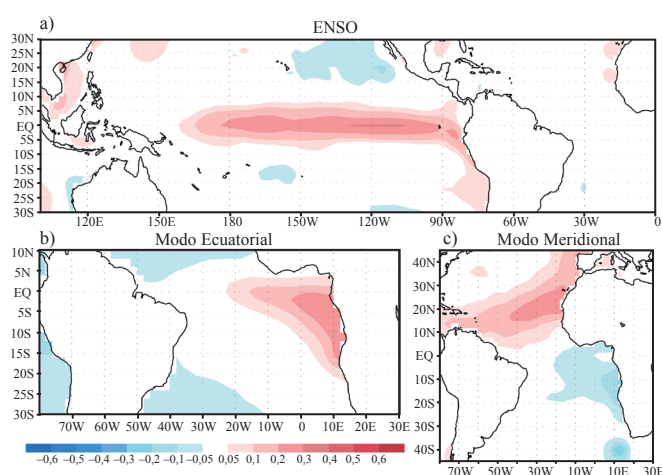
La sección 2 describe los principales patrones globales tanto atmosféricos como oceánicos. La sección 3 muestra los principales patrones regionales que afectan a la zona Euro-Atlántica. Finalmente, en la sección 4 se clasifican y presentan los principales tipos de circulación que a escala sinóptica afectan a la misma región Euro-Atlántica. En todas las secciones se discute cómo la última generación de modelos climáticos es capaz de representar los diferentes tipos de fluctuaciones existentes en el clima actual y cómo estas fluctuaciones pudieran verse alteradas en un escenario de clima cambiante. La sección 5 presenta las conclusiones y algunas cuestiones abiertas en relación con los diferentes tipos de fluctuaciones y sus interacciones.

## 2. Patrones de variabilidad globales

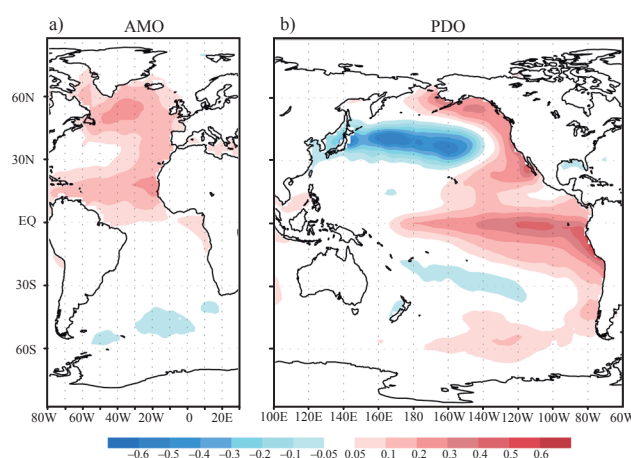
El patrón de teleconexión global más importante que se conoce es el fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO, siglas en inglés correspondientes a “El Niño-Southern Oscillation”). Se trata de un fenómeno que ocurre a escalas interanuales, con una periodicidad de entre 3 y 7 años, y que alcanza su amplitud máxima en el verano austral (figura 1a). ENSO presenta un comportamiento acoplado entre el océano y la atmósfera de forma que se caracteriza por un calentamiento (enfriamiento) en su fase positiva (negativa, también denominada La Niña) del océano Pacífico tropical desde la costa de Perú hasta el Pacífico central, acompañado por un descenso (aumento) en el gradiente de presiones entre el este y el oeste del Pacífico ecuatorial (Philander, 1990); un cambio en el régimen de vientos alisios del Pacífico, así como de la pendiente de la termoclina, con comportamientos anómalos en el sistema de afloramiento del Perú. El fenómeno ENSO no solamente introduce varia-

bilidad en la atmósfera a escala local sino que también a escala global a través de teleconexiones (Wang, 2002). La alta predecibilidad de ENSO es la razón de que la principal señal de predicción a escala estacional en diferentes regiones esté ligada a las teleconexiones de ENSO.

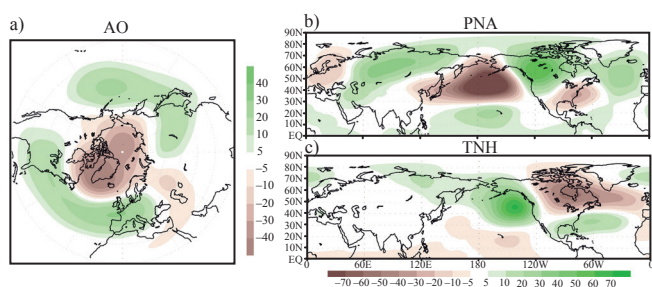
A pesar de que el ENSO es el patrón de variabilidad oceánico más relevante, el resto de los océanos también presentan sus propios patrones de variabilidad, que explican una parte importante de las fluctuaciones climáticas a escalas global y regional. En el océano Atlántico tropical aparecen dos patrones principales: el Modo Ecuatorial (véase figura 1b) y el Modo Meridional (véase figura 1c) (Ruiz-Barradas et al., 2000). El primero se caracteriza por la aparición de anomalías de temperatura de la superficie del mar (TSM) en el atlántico ecuatorial, presentando una dinámica similar al Niño en el Pacífico, con máxima variabilidad en el verano boreal y a escalas interanuales. El segundo presenta anomalías de TSM de distinto signo a ambos lados del ecuador y su máxima variabilidad aparece a escalas decadales. Ambos modos tienen un impacto clave en el clima de regiones colindantes. En el océano Atlántico también aparecen oscilaciones a escala multidecadal como la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, siglas en inglés), mostrada en la figura 2a, y caracterizada por un contraste interhemisférico de anomalías de TSM que afecta al clima en escalas globales (Knight et al., 2005). Se trata de un patrón multidecadal, con una periodicidad de 50-70 años (Kerr, 2000). En el océano Pacífico, el modo de variabilidad principal a escalas decadales es la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, siglas en inglés), mostrada en la figura 2b, y caracterizada por la aparición de anomalías de TSM de distinto signo en el Pacífico norte extratropical y en el Pacífico tropical (Mantua et al., 1997). Se considera que la PDO es la parte del Hemisferio Norte de la Oscilación Interdecadal del Pacífico (IPO, siglas en inglés) descrita por Power et al. (1999). Por último, en el océano Índico se ha descrito un modo de variabilidad conocido como el Dipolo del Océano Índico (OID, siglas en inglés), en el que anomalías de TSM



**Fig.1.** Patrones de variabilidad representados mediante el coeficiente de regresión para la TSM: a) Niño3.4 (referido al área delimitada por 5°N-5°S y 170°-120°W) invernal (def); b) Atlántico Ecuatorial estival (jjas); y c) Atlántico Meridional estival (jjas). Los diferentes índices han sido tomados de la base de datos de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list>).



**Fig.2.** Patrones de variabilidad decadal representados por el coeficiente de regresión para la TSM: a) Oscilación Multidecadal del Atlántico; y b) Oscilación Decadal del Pacífico. Los diferentes índices han sido tomados de la base de datos de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list>).



**Fig.3.** Patrones de variabilidad atmosférica representados por el coeficiente de regresión para el neopotencial de 500hPa: a) Oscilación Ártica anual; b) Pacífico/América del Norte invernal (ef); y c) Tropical/Hemisferio Norte invernal (ef); Los diferentes índices han sido tomados de la base de datos de la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list>).

de distinto signo aparecen en la costa de Sumatra y del océano Índico occidental (Saji et al., 1999; Webster et al., 1999), altamente acoplado con la atmósfera y con máxima variabilidad durante el otoño boreal.

En cuanto a la atmósfera, el principal modo de variabilidad en el hemisferio norte extratropical es la Oscilación Ártica (AO, siglas en inglés), que presenta (véase figura 3a) un centro de acción sobre el Ártico y un antinodo en latitudes medias (Thompson y Wallace, 1998). Debido a su simetría zonal también se conoce como Modo Anular del Norte (NAM, siglas en inglés). La AO se caracteriza porque su extensión vertical alcanza hasta niveles estratosféricos, afectando a la variabilidad del vórtice polar estratosférico. La parte de la AO del sector atlántico puede considerarse como el patrón conocido como Oscilación del Atlántico Norte (NAO, siglas en inglés), del que se hablará en la siguiente sección. Otro modo de variabilidad atmosférico de baja frecuencia importante es el patrón del Pacífico/América del Norte (PNA, siglas en inglés), que se muestra en la figura 3b (Wallace y Gutzler, 1981; Barston y Livezey, 1987). Este patrón presenta cuatro centros de acción, sobre Hawaii, las Islas Aleutianas, América del Norte y sureste de Estados Unidos, y se asocia con cambios en la fuerza y la localización de la corriente en chorro de Asia oriental. Su fase positiva (negativa) presenta anomalías positivas (negativas) de presión en los centros de Hawaii y América del Norte (Aleutianas y sureste de Estados Unidos), y tiende a asociarse con episodios del Niño (Niña) en el Pacífico. Aunque se ha discutido si este modo podría estar forzado o no por el Niño (Straus and Shukla, 2002; Enfield y Mayer, 1997) se sabe que el patrón canónico atmosférico asociado al ENSO es el patrón Tropical/Hemisferio Norte (TNH, siglas en inglés), con centros de acción en el Golfo de Alaska, Este de Canadá y Golfo de México-Atlántico Norte occidental, que se muestra en la figura 3c (Mo y Livezey, 1986; Bladé et al., 2008). A menudo, un evento ENSO positivo aparece asociado a una fase negativa del TNH (Barnston et al., 1991), caracterizada por bajas presiones en los centros de los Golfos de Alaska y México y altas en el este de Canadá.

Los patrones que aquí se han descrito pertenecen principalmente a los modos de variabilidad del hemisferio norte. En el hemisferio sur hay otra serie de patrones importantes como es el Modo Anular del Hemisferio Sur (SAM, siglas en

inglés) (Thompson y Wallace, 2000; Thompson et al., 2000) ó la Oscilación del Pacífico Sur (PSO, siglas en inglés) (Mo y Higgins, 1998), que no se abordan en este artículo.

Tanto lo modos de variabilidad globales, descritos en este apartado, como los regionales, descritos más abajo, se han estudiado muy extensamente por su relación con los patrones de precipitación y temperatura. Esta relación no siempre es estacionaria, como sucede por ejemplo en el caso de la relación entre ENSO y la precipitación en el Mediterráneo occidental (Mariotti et al, 2002; Rodriguez-Fonseca y Rodriguez-Puebla, 2010).

Los modelos de clima simulan de forma diferente las principales características de estos modos de variabilidad, como, por ejemplo, la posición e intensidad de sus centros de acción. Si se toman como referencia los datos observacionales, se puede evaluar la distinta capacidad de un conjunto de modelos para simular dichas características. Cuanto más realista sea la semejanza con los modos observados, tanto más adecuadamente representarán las características dinámicas atmosféricas asociadas los diferentes modelos (Pierce, 2004). En este contexto, la capacidad de los modelos climáticos para simular los diferentes patrones de variabilidad se puede resumir, de acuerdo con el cuarto Informe de Evaluación (AR4 de sus siglas en inglés) del IPCC (2007), de la siguiente forma:

- 1) Aunque en los últimos años se ha mejorado mucho en la simulación del ENSO, los modelos todavía presentan problemas para representar su estructura espacial (Randall et al., 2007). En cuanto a su variabilidad temporal, AchutaRao y Sperber (2006) encuentran que es consistente con la observada para varios de los modelos estudiados.
- 2) Diferentes modelos climáticos son capaces de simular tanto la estructura espacial como la variabilidad de la AMO (Latif, 1998; Knight et al., 2005; Delworth y Mann, 2000). Los cambios de la TSM del Océano Atlántico asociados con la AMO parecen ser predecibles con varias décadas de anterioridad (Randall et al., 2007). Respecto a la PDO, la mayoría de los modelos globales de clima simulan su variabilidad adecuadamente (Meehl y Hu, 2006), aunque se necesitan más estudios para evaluar la simulación de su amplitud (Randall et al., 2007).
- 3) La mayoría de los modelos globales son capaces de representar la AO de forma realista (Miller et al., 2006; Cai et al., 2003), a pesar de que la variabilidad de la mayoría de ellos es mayor que la observada (Osborn, 2004).
- 4) El patrón de PNA simulado por modelos acoplados durante el invierno boreal presenta correlaciones significativas con las observaciones, tanto para los diferentes modelos estudiados como para la media de los mismos. Sin embargo, la habilidad de los modelos es menor para el resto de las estaciones (Randall et al., 2007).

La respuesta al forzamiento antropogénico puede explicarse por cambios en las características de los modos de variabilidad (Trenberth et al., 2007) tales como su frecuencia de ocurrencia, posición o intensidad (Palmer, 1999; Corti et al., 1999). En AR4 se concluye que los cambios

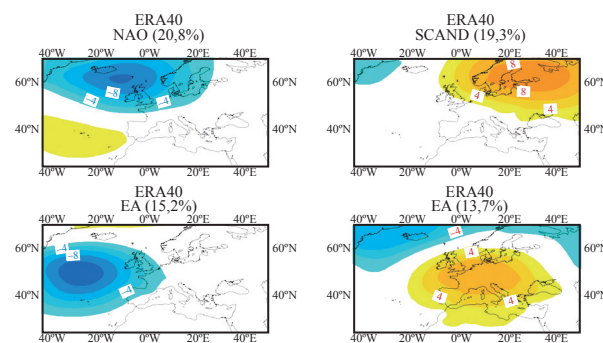


en la variabilidad interanual y amplitud del ENSO bajo escenarios de cambio climático son altamente dependientes del modelo utilizado, de forma que no se puede llegar a una conclusión robusta acerca de dichos cambios (Meehl et al., 2007). No obstante, Sterl et al. (2007) sugieren que si existieran cambios en las teleconexiones con ENSO, sólo se podrían detectar en escalas seculares, siendo más susceptibles a cambios las regiones del Pacífico Ecuatorial central, y los océanos Índico y Atlántico Norte. En cuanto a la AO, Meel et al. (2007) describen que, aunque la magnitud de la tendencia varía con el modelo utilizado, las proyecciones futuras indican una tendencia positiva estadísticamente significativa del índice desde principios del siglo XXI (Rauthe et al., 2004; Miller et al., 2006).

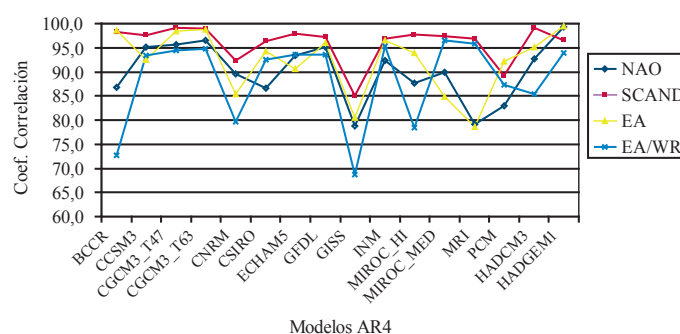
### 3. Patrones de variabilidad regionales

Mientras que en la sección anterior se han presentado patrones atmosféricos y oceánicos que afectan a escala global, existen también patrones más reducidos que influyen en las condiciones climáticas regionales. Como un ejemplo de patrones regionales de variabilidad, los principales modos para la región Euro-Atlántica son: a) la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, siglas en inglés), caracterizada por presentar altas anomalías negativas de la presión al nivel del mar sobre Groenlandia e Islandia y altas anomalías positivas sobre los 40°N en el océano Atlántico y oeste de Europa; b) el modo Escandinavo (SCAND, abreviatura en inglés) caracterizado por presentar un importante centro de anomalías sobre Escandinavia y un centro más débil sobre Europa occidental de signo contrario; c) el modo del Este del Atlántico (EA, siglas en inglés), formado por un dipolo norte-sur de anomalías sobre el Atlántico norte y d) el modo del Este del Atlántico/Oeste de Rusia (EA/WR, siglas en inglés), con dos centros importantes de anomalías de signo contrario localizados sobre el mar Caspio y oeste de Europa. En la figura 4 se muestran estos cuatro modos de variabilidad calculados para el periodo invernal (Casado y Pastor, 2010). La mayor varianza explicada corresponde a la NAO (20.8%) y la menor al modo EA/WR (13.7%).

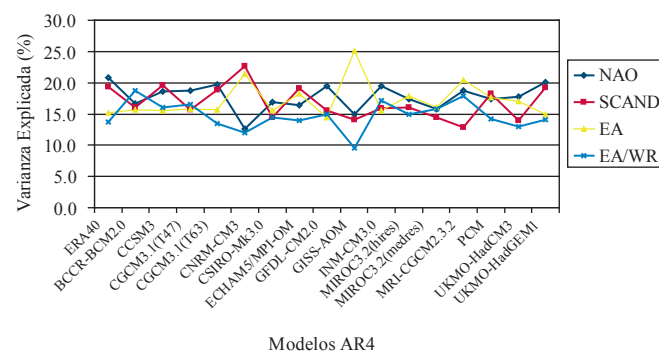
Al igual que para los modos globales, los modelos climáticos simulan diferentemente los modos regionales. Se puede analizar la distinta habilidad de los modelos para simular diferentes características de estos modos de variabilidad. Como ejemplo de evaluación de modelos se analizan las diferencias en la posición de los centros de acción y en su intensidad considerando el coeficiente de correlación lineal de Pearson entre los modos observacionales y los correspondientes a los modelos AR4 (Casado y Pastor, 2010). Como se observa en la figura 5, todos los modelos presentan en general correlaciones bastante altas, comprendidas entre 68.7% y 99.5% para los 4 modos. El SCAND es el modo que presenta un mayor número de modelos con las correlaciones más altas mientras que el EA/WR muestra, en general, las correlaciones más bajas.



**Fig. 4.** Los cuatro principales modos de variabilidad atmosférica obtenidos sobre la región Euro-Atlántica a partir de datos de presión reducida al nivel del mar (ERA40). Intervalo 2 hPa. Entre paréntesis la varianza explicada por cada modo.



**Fig. 5.** Coeficiente de correlación espacial (%) para los patrones NAO, SCAND, EA y EA/WR obtenido a partir de los datos de reanálisis (ERA40) y de los distintos modelos AR4-IPCC.



**Fig. 6.** Porcentaje de varianza explicada (%) por los distintos modos (NAO, SCAND, EA y EA/WR) obtenidos a partir de reanálisis (ERA40) y de los modelos AR4-IPCC.

Analizando la varianza explicada para cada modo (figura 6), se observa que en general para la NAO y el SCAND los modelos subestiman la varianza explicada respecto a la observación (ERA40, Uppala et al., 2005), mientras que para el EA y el EA/WR en general los modelos sobreestiman dicha varianza.

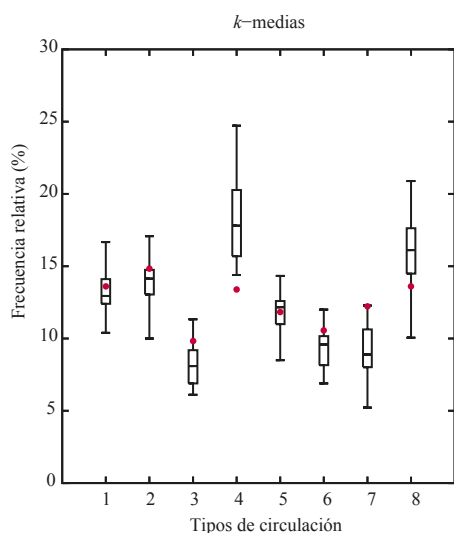
Diversos resultados realizados con modelos regionales han demostrado que en climas más calientes se produce un aumento de las fases positivas de la NAO, un incremento en la significación de la respuesta de la precipitación a la NAO, así como un desplazamiento hacia el noroeste de sus centros de acción (Rodríguez-Fonseca et al., 2005).

#### 4. Perturbaciones sinópticas regionales

Existe cada vez un mayor número de estudios que tratan de relacionar las tendencias climáticas y la variabilidad de la circulación atmosférica con las escalas de tiempo sinópticas. Una forma de estudiar dichas escalas sinópticas se basa en la aplicación de técnicas de clasificación para la circulación atmosférica (Huth et al., 2008). En términos generales, clasificación significa agrupación en clases o “conglomerados” de entidades que comparten características comunes en cada grupo y presentan grandes diferencias entre los distintos grupos resultantes de la clasificación.

La clasificación de la circulación atmosférica en una colección relativamente pequeña de tipos de circulación (TC) permite analizar las características del clima, de su variabilidad y de su evolución en función de características de los tipos de circulación tales como frecuencia de ocurrencia, tiempos medios de residencia, probabilidad de transiciones entre tipos, etc. (Demuzere et al., 2009; Casado et al., 2009). Estas características de los TC pueden calcularse sobre datos observacionales y sobre modelos climáticos, pudiendo utilizarse como evaluación de estos últimos previa definición de métricas que relacionen las características de los modelos y las observacionales.

Como ejemplo de lo anterior se ha aplicado un esquema de clasificación de *k*-medias al ERA40 para el invierno en la región Euro-Atlántica y considerando 8 TC. De la comparación de las frecuencias de ocurrencia de los TC del ERA40 con las obtenidas para los modelos del AR4, se deduce que para todos los TC, con excepción del TC4 y TC8, en general todos los modelos tienden a infraestimar los valores de la frecuencia, siendo este sesgo negativo más acusado para el TC7, tipo de circulación caracterizado por dos áreas de altas presiones, una sobre Rusia y otra más débil sobre Azores y Canarias y un centro de bajas presiones al suroeste de Islandia (véase figura 7).



**Fig.7.** Diagrama de cajas de las frecuencias expresadas en porcentaje de los 8 Tipos de Circulación (TC) del invierno de los modelos del AR4 para el esquema de clasificación *k*-medias y periodo de referencia. Las barras horizontales inferiores (superiores) indican los valores mínimos (máximos). Los extremos inferiores (superiores) de las cajas señalan el primer (tercer) cuartil y el segmento central la mediana. Las frecuencias para el ERA40 vienen representadas por el círculo rojo.

Es importante destacar que para el TC4, ligado a flujo del oeste sobre el continente con altas presiones sobre Canarias y bajas presiones sobre Irlanda, todos los modelos sobreestiman de forma acusada la frecuencia (Casado et al., 2011).

En un escenario de evolución futura (SRES A2 (Nakicenovic et al., 2000)), se observa que salvo en el caso del TC7, en el que en general todos los modelos presentan aumento en la frecuencia, para el resto de los TC existe una gran dispersión entre los diferentes modelos que hace que no se pueda concluir una tendencia robusta (Casado et al., 2011).

#### 5. Conclusiones y perspectivas

Se han descrito de forma unificada las diferentes fluctuaciones que afectan al sistema climático y que permiten describir el clima y su variabilidad en diferentes escalas temporales y espaciales. Se ha discutido la capacidad de los modelos climáticos para simular las principales características asociadas a los patrones de variabilidad climática tanto en atmósfera como en océano y para diferentes escalas espaciales y temporales. Igualmente, se ha discutido la capacidad de los modelos para simular las fluctuaciones sinópticas que afectan día a día a la región Euro-Atlántica y que promediadas en el tiempo son responsables de la variabilidad climática.

La descripción de las fluctuaciones que se presentan en el sistema climático debe ir acompañada de un mejor conocimiento de las interacciones entre diferentes escalas y en última instancia de los procesos físicos responsables de dichas fluctuaciones. El desarrollo de los modelos de predicción a corto y medio plazo avanza analizando y verificando las predicciones a escala sinóptica y sobre todo entendiendo y simulando los procesos físicos que subyacen en estas escalas temporales y espaciales. En la mejora continua de los modelos juega un papel esencial el análisis de los errores sistemáticos como vía para entender las deficiencias de los modelos que son frecuentemente atribuibles a carencias en la comprensión de los procesos físicos relevantes y en su parametrización.

Los modelos climáticos se evalúan frecuentemente analizando sus simulaciones de los modos de variabilidad frente a las observaciones y/o re-análisis. Para avanzar en paralelo ambas comunidades de modelización –corto plazo y climática– es esencial relacionar las características de variabilidad climática con los procesos físicos que son en última instancia responsables de ellas.

El alto número de grados de libertad que posee el sistema climático lo hace extremadamente complejo. Este nivel de complejidad puede reducirse notablemente mediante la introducción de los modos de variabilidad, que por otra parte se obtienen de forma natural aplicando técnicas estadísticas de reducción de la dimensionalidad basadas en análisis de componentes principales. El estudio de los modos de variabilidad de la atmósfera y del océano constituye una aproximación sistemática a la dinámica, tanto interna como forzada externamente, del sistema climático que además permite utilizar la perspectiva del marco conceptual de los sistemas dinámicos. El sistema climático posee estados recurrentes asociados a estados estables e inestables, atractores, bifurcaciones, etc que encuentran un adecuado marco teórico en el campo de los sistemas dinámicos.

## Referencias

- [1] ACHUTARAO K., SPERBER, K.R. *ENSO simulation in coupled ocean-atmosphere models: are the current models better?* Clim. Dyn., **27**, 1–15, 2006. DOI: 10.1007/s00382-006-0119-7.
- [2] BARNSTON, A.G., LIVEZEY, R.E. *Classification, Seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns*. Mon. Weath. Rev., **115**, 983–1126, 1987.
- [3] BARNSTON A.G., LIVEZEY, R.E., HALPERT, M.S. *Modulation of Southern Oscillation-Northern Hemisphere Mid-Winter Climate Relationships by the QBO*. J. Clim., **4**, 203–217, 1991.
- [4] BELL, G.D., HALPERT, M.S. *Atlas of intraseasonal and interannual variability, 1986–1993*. NOAA Atlas No. 12. Climate Prediction Center, NOAA/NWS/NMC, Washington D.C, 1995.
- [5] BLADÉ, I., NEWMAN, M., ALEXANDER, M.A., SCOTT, J.D. *The Late Fall Extratropical Response to ENSO: Sensitivity to Coupling and Convection in the Tropical West Pacific*. J. Climate, **21**, 6101–6118, 2008. DOI: 10.1175/2008JCLI1612.1.
- [6] CAI, W., WHETTON, P.H., KAROLY, D.J. *The Response of the Antarctic Oscillation to Increasing and Stabilized Atmospheric CO<sub>2</sub>*. J. Clim., **16**, 1525–1538, 2003.
- [7] CASADO, M.J., PASTOR, M.A. Y DOBLAS-REYES, F.J. *Euro-Atlantic circulation types and modes of variability in winter*. Theoretical and Applied Climatology, **96**, Issue 1-2, pp. 17-29, 2009. DOI: 10.1007/s00704-008-0036-2.
- [8] CASADO, M.J., PASTOR, M.A. *Use of variability modes to evaluate AR4 climate models over the Euro-Atlantic region*. Enviado a Clim. Dyn, 2010.
- [9] CASADO, M.J ET AL. *Evaluación de los modelos climáticos globales participantes en el cuarto Informe de Evaluación del IPCC sobre España y la región Euro-Atlántica*. Publicación de AEMET. 2011.
- [10] CASSOU, C., Y GUILYARDI, E. *Modes de variabilité et changement climatique. Synthèse du quatrième rapport d'évaluation du Giec*. La Météorologie, **59**, 22-30, 2007.
- [11] CORTI S., MOLTENI, F., PALMER, T. *Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes*. Nature, **398**, 799-802, 1999.
- [12] DELWORTH, T.L., MANN, M.E. *Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere*. Clim. Res., **16**, 661-676, 2000.
- [13] DEMUZERE M., WERNER, M., VAN LIPZIG, N.P.M., ROECKNER, E. *An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns*. International Journal of Climatology, **29**, 1796-1811, 2009.
- [14] ENFIELD, D.B. Y MAYER, D.A. *Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño Southern Oscillation*. J. Geophys. Res., **102**, 929-945, 1997.
- [15] HUTH R, BECK, C., PHILIPP, A., DEMUZERE, M., USTRNUL, Z., CAHYNOV, M., KYSELÝ, K. Y TVEITO, O.E. *Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications*. Ann. N.Y.Acad. Sci., **1146**, 105-152, 2008.
- [16] IPCC, (2007): *Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. S. Salomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, y K.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, U.K. y New York, NY, USA, 996 pp.
- [17] KERR, R.A. *A North Atlantic climate pacemaker for the centuries*, Science, **288**, 1984-1986, 2000.
- [18] KNIGHT, J. R., ALLAN, R.J., FOLLAND, C., VELLINGA, C.K.M. Y MANN, M.E. *A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate*. Geophys. Res. Lett., **32**, 2005, L20708, DOI: 10.1029/2005GL024233.
- [19] LATIF, M. *Dynamics of Interdecadal Variability in Coupled Ocean-Atmosphere Models*. J. Clim., **11**, 602–624, 1998.
- [20] MANTUA, N.J., HARE, S.R., ZHANG, Y., WALLACE, J.M., FRANCIS, R.C. *A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on Salmon production*. Bull. Am. Meteorol. Soc., **78**, 1069–1079, 1997.
- [21] MARIOTTI, A., ZENG, N., LAU, K.M. *Euro-Mediterranean rainfall and ENSO – a seasonally varying relationship*. Geophysical Research Letters, **29** (12), 2002. 10.1029/2001GL014248.
- [22] MEEHL, G.A., STOCKER, T.F., COLLINS, W.D., FRIEDLINGSTEIN, P., GAYE, A.T., GREGORY, J.M., KITCH, A., KNUTTI, R., MURPHY, J.M., NODA, A., RAPER, S.C.B., WATTERSON, I.G., WEAVER, A.J., ZHAO, Z.C. *Global climate projections*. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds) Climate Change (20: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge. 2007.
- [23] MEEHL, G.A., HU, A. *Megadroughts in the Indian Monsoon region and southwest North America and a mechanism for associated multidecadal Pacific sea surface temperature anomalies*. J. Clim., **19**, 1605–1623, 2006.
- [24] MILLER, R.L., SCHMIDT, G.A., SHINDELL, D.T. *Forced variations of annular modes in the 20th century IPCC AR4 simulations*. J. Geophys. Res., **111**, 2006, D18101, doi:10.1029/2005JD006323.
- [25] MO, K.C., LIVEZEY, R.E. *Tropical-Extratropical Geopotential Height Teleconnections during the Northern Hemisphere Winter*. Mon. Wea. Rev., **114**, 2488–2515, 1986.
- [26] MO, K.C., HIGGINS, R.W. *The Pacific–South American Modes and Tropical Convection during the Southern Hemisphere Winter*. Mon. Wea. Rev., **126**, 1581–1596, 1998.
- [27] NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., DAVIS, G., DE VRIES, B., FENHANN, J., GAFFIN, S., GREGORY, K., GRÜBLER, A., JUNG, T.Y., KRAM, T., LA ROVERE, E.L., MICHAELIS, L., MORI, S., MORITA, T., PEPPER, W., PITCHER, H., PRICE, L., RIAHI, K., ROEHL, A., ROGNER, H., SANKOVSKI, H.A., SCHLESINGER, M., SHUKLA, P., SMITH, S., SWART, R., VAN ROOIJEN, S., VICTOR, N., DADI, Z. *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 599 pp, 2000.
- [28] OSBORN, T.J. *Simulating the winter North Atlantic Oscillation: The roles of internal variability and greenhouse forcing*. Clim. Dyn., **22**, 605-623, 2004.
- [29] PALMER, T. *A nonlinear dynamical perspective on climate prediction*. J. Clim., **12**, 575-591, 1999.
- [30] PHILANDER, S.G.H. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. Academic Press, 293 pp, 1990.
- [31] PIERCE, D.W. *Beyond the means: Validating climate models with higher-order statistics*. Computing in Science and Engineering, **6**, 22-29, 2004.
- [32] POWER S., CASEY, T., FOLLAND, C., COLMAN, A., MEHTA, V. *Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia*. Clim. Dyn., **15**, 319–324, 1999.
- [33] RANDALL, D.A., WOOD, R.A., BONY, S., COLMAN, R., FICHEFET, T., FYFE, J., KATTISOV, V., PITMAN, A., SHUKLA, J., SRINIVASAN, J., STOUFFER, R.J., SUMIAND, A., TAYLOR, K.E. *Climate Models and Their Evaluation*. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.
- [34] RAUTHE, M., HENSE, A., PAETH, H. *A model intercomparison study of climate change-signals in extratropical circulation*. Int. J. Climatol., **24**, 643–662, 2004.
- [35] RIVIÈRE, G., ORLANSKI, I. *Characteristics of the Atlantic Storm-Track Eddy Activity and Its Relation with the North Atlantic Oscillation*. J. Atmos. Sci., **64**, 241–266, 2007. DOI: 10.1175/JAS3850.1.
- [36] RODRÍGUEZ-FONSECA, B., SANCHEZ, E., ARRIBAS, A. *Winter climate variability changes over Europe and the Mediterranean region under increased greenhouse conditions*. Geophys. Res. Lett., **32**, L13702, 2005. doi:1029/2005GL022800.
- [37] RODRÍGUEZ-FONSECA, B., RODRÍGUEZ-PUEBLA, C., & CO-AUTORES. *Teleconexiones climáticas en el entorno de la península ibérica. Predictabilidad y cambios esperados*. En *Clima en España: Pasado, Presente y Futuro. Informe de evaluación del cambio climático regional*. 2010.



- [38] RUIZ-BARRADAS A., CARTON, J.A., NIGAM, S. *Structure of Interannual-to-Decadal Climate Variability in the Tropical Atlantic Sector*. J. Clim., **13**, 3286-3297, 2000.
- [39] SAJI, N.H., GOSWAMI, B.N., VINAYACHANDRAN, P.N., YAMAGATA, T. *A dipole mode in the tropical Indian Ocean*. Nature, **401**, 360-363, 1999.
- [40] STERL, A., VAN OLDENBORGH, G.J., HAZELEGER, W., BURGERS, G. *On the robustness of ENSO teleconnections*. Clim. Dyn., **29**, 469-485. 2007. DOI: 10.1007/s00382-007-0251-z.
- [41] STONER, K., HAYHOE, K., WUEBBLES, D.J. *Assessing General Circulation Model simulations of atmospheric teleconnection patterns*. J. Clim., **22**, 4348-4372, 2009.
- [42] STRAUS, D.M., SHUKLA, J. *Does ENSO Force the PNA?* J. Clim., **15**, 2340-2358, 2002.
- [43] THOMPSON, D.W.J., WALLACE, J.M. *Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability*. J. Climate, **13**, 1000-1016, 2000.
- [44] THOMPSON, D.W.J., WALLACE, J.M., HEGERL, G.C. *Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part II: Trends*. J. Climate, **13**, 1018-1036, 2000.
- [45] THOMPSON, D.W.J., WALLACE, J.M. *The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields*. Geophys. Res. Lett., **25**, 1297-1300, 1998.
- [46] TRENBERTH, K.E., JONES, P.D., AMBENJE, P., BOJARIU, R., EASTERLING, D., KLEIN TANK, A., PARKER, D., RAHIMZADEH, F., RENWICK, J.A., RUSTICUCCI, M., SODEN, B. Y ZHAI, P. *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change*. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ed. Q. D. Solomon S, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, N.Y., USA. 2007.
- [47] UPPALA, S.M., KÄLLBERG, P.W., SIMMONS, A.J., ANDRAE, U., DA COSTA BECHTOLD, V., FIORINO, M., GIBSON, J.K., HASELER, J., HERNANDEZ, A., KELLY, G.A., LI, X., ONOGI, K., SAARINEN, S., SOKKA, N., ALLAN, R.P., ANDERSSON, E., ARPE, K., BALMASEDA, M.A., BELJAARS, A.C.M., VAN DE BERG, L., BIDLOT, J., BORMANN, N., CAIRES, S., CHEVALLIER, F., DETHOF, A., DRAGOSAVAC, M., FISHER, M., FUENTES, M., HAGEMANN, S., HÖLM, E., HOSKINS, B.J., ISAKSEN, L., JANSSEN, P.A.E.M., JENNE, R., McNALLY, A.P., MAHFOUF, J.F., MORCRETE, J.J., RAYNER, N.A., SAUNDERS, R.W., SIMON, P., STERL, A., TRENBERTH, K.E., UNTCH, A., VASILJEVIC, D., VITERBO, P., Y WOOLLEN, J. *The ERA-40 re-analysis*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, **131**, 2961-3012. DOI:10.1256/qj.04.176.
- [48] WALLACE J.M., GUTZLER, D.S. *Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere Winter*. Mon. Wea. Rev., **109**, 784-812, 1981.
- [49] WANG, C. *Atlantic climate variability and its associated atmospheric circulation cells*. J. Clim., **15**, 1516-1536, 2002.
- [50] Webster, P.J., Moore, A.M., Loschniggy, J.P., Leben, R.R. *Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98*. Nature, **401**, 356-360, 1999.

**M. J. Casado Calle, E. Rodríguez Camino**

Agencia Estatal de Meteorología

**T. Losada Doval, B. Rodríguez-Fonseca**

Facultad de Físicas, Universidad Complutense de Madrid